不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响

罗仙英[1]，莫荣海[1]，丁贵杰[1,2*]，陈龙[1]

（1. 贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心/贵州大学林学院 贵阳 550025；2. 贵州省高原山地林木培育重点实验室 贵阳 550025）

摘 要：为获得马尾松幼苗最佳施肥配方，以1年生马尾松幼苗为试验材料，采用 L_{16}（4^3）正交设计，并通过测定幼苗苗高、地径、生物量、叶绿素含量、叶片N、P、K含量，探讨不同N、P、K配比施肥对马尾松幼苗生长特征影响。结果表明：（1）不同配比施肥处理间马尾松幼苗苗高、地径、生物量、质量指数、叶绿素和养分含量存在显著差异，其中，处理12生物量、质量指数、叶绿素a和总叶绿素含量、隶属值最高。（2）施N对幼苗生长及生理指标均存在极显著影响；施K对苗高、地径、地上生物量、总生物量有显著影响，对叶绿素和针叶养分有极显著影响；施P对叶绿素a、叶绿素b、针叶N、P含量有极显著影响，对苗高、地下生物量、总叶绿素含量有显著影响。（3）施N对苗高、地径、地上生物量、总生物量、质量指数、叶绿素a含量、总叶绿素含量及针叶N含量的影响最大，K次之，P最小。各因素对地下生物量和针叶P含量的影响均表现为N>P>K。（4）N3水平利于幼苗苗高地径的生长及生物量的积累，N4水平利于叶绿素a和总叶绿素含量及针叶N、P含量的积累，P4水平利于生物量、叶绿素含量及养分P含量的积累。综合分析可知，马尾松幼苗前期应以施N为主，配施P和K相辅，配施N3P4K2营养液利于提升幼苗综合质量，即N、P、K浓度分别8.25、1.00、1.50 mmol·L^{-1}。

关键词：马尾松，幼苗，配比施肥，生长，苗木质量

中图分类号：Q945; S72 **文献标识码：**A

Effect of different fertilization ratio on the growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings

LUO Xianying[1], MO Ronghai[1], DING Guijie[1,2*], CHEN Long[1]

（1. *Institute for Forest Resources and Environment of Guizhou/College of Forest Guizhou University*, Guiyang 550025; 2. *Key Laboratory of Forest Cultivation in Plateau Mountain of Guizhou Province*, Guiyang 550025）

Abstract: In order to obtain the optimal fertilization formula for *Pinus massoniana* seedlings, one-year-old seedlings were selected and grown in a L_{16} (4^3) orthogonal design. Traits, such as seedling height, ground diameter, biomass, leaf chlorophyll content and N, P, K contents, were measured to explore the effects of different N, P, K ratio fertilization on growth characteristics. The results were as follows: (1) There were significant differences in seedling height, ground

项目基金：国家"十三五"重点研发项目（2017YFD0600302）；贵州省国家后补助课题（黔科合平台人才[2018]5261）[Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0600302) ; the Science and Technology Planning Project of Guizhou province, China([2018]5261)]。

作者简介：罗仙英（1995-），硕士研究生，研究方向为林木栽培生理生态与分子生物学，(Email)1570880469@qq.com

***通信作者：**丁贵杰，教授，博士研究生导师，从事森林培育及人工林稳定性研究，(Email)gjdinggzu@126.com。

diameter, biomass, quality index, chlorophyll and nutrient contents among different fertilization ratio treatments. Among them, treatment 12 had the highest biomass, quality index, chlorophyll a and total chlorophyll contents, and membership value. (2) N application had highly significant effects on growth and physiology. K application had highly significant effects on seedling height, ground diameter, above-ground biomass, total biomass, chlorophyll and needle nutrients. Besides, P application had highly significant effects on chlorophyll a, chlorophyll b, N and P contents in needles, but had significant effects on seedling height, under-ground biomass and total chlorophyll content. (3) N application had greater effect on seedling height, ground diameter, above-ground biomass, total biomass, quality index, chlorophyll a content, total chlorophyll content and N content in needles than K and P applications. The effects on under-ground biomass and P contents of needles were as N>P>K. (4) N3 level was beneficial to seedling height, diameter and biomass accumulation. N4 level was beneficial to the accumulation of chlorophyll content and the content of N and P in needles, while P4 level was beneficial to biomass accumulation, chlorophyll content and P accumulation. Comprehensive analysis showed that N should be applied mainly in the early stage of *P. massoniana* seedlings, supplemented by P and K. N3P4K2 nutrient solution can improve the overall quality of seedlings, with N, P and K concentrations as 8.25, 1.00 and 1.50 mmol·L^{-1}, respectively.

Keywords: *Pinus massoniana*, seedling, proportioned fertilization, growth, seedling quality

施肥是改善土壤养分并提高苗木质量的重要措施之一，在苗木管理中常选用氮（N）、磷（P）、钾（K）作为施肥源料，常被植物以吸收运输及同化方式将其运用到生理代谢活动中，其含量的高低对苗木质量的好坏有直接影响（杨阳等，2021）。三者合理协调供应有利于植物各器官 N、P、K 含量维持相对平衡状态，在满足生长所需养分的同时促进干物质积累和提升综合质量，达到节本增效、用养结合、增强抗逆性的目的（Schoenbeck et al.,2020；Peng et al., 2020）。近年来，苗木配比施肥的研究已见大量报道，常见于薄壳山核桃（*Carya illinoensis*）（郑小琴等，2019）、辣木（*Moringa oleifera*）（张敏等，2019）、紫椴（*Tilia amurensis*）（杨阳等，2021）、楸树（*Catalpa bungei*）（王祥等，2021）等树种中。研究表明，根据苗木的需肥特性进行配比施肥研究是提高肥效的关键所在，施肥过多或过少会造成资源浪费或养分不足（张明等，2019；杨阳等，2021）。在闽楠（*Phoebe bournei*）、灰木莲（*Manglietia glauca*）、薄壳山核桃（*Carya illinoinensis*）等配方施肥研究中发现，合理 N、P、K 配施后，苗木通过提高光合色素含量，增强叶片捕光能力，加速光合产物合成，促进苗木苗高地径生长及生物量积累（陈琳等，2017；郑小琴等，2019；Wang et al., 2020）。已有相关研究通过了解薄壳山核桃、紫椴幼苗施肥后叶片 N、P、K 含量，掌握幼苗的养分分布及植株营养状况（郑小琴等，2019；杨阳等，2021）。但由于树种的遗传性状存在差异，不同配比施肥条件下，苗木对肥效的响应不同，例如，灰木莲光合受 P 的影响较大，而薄壳山核桃主要受 N 的影响（陈琳等，2017；郑小琴等，2019；杨阳等，2021）。另外，不同树种的最佳施肥量不同，不同树种的最佳施肥配方尚不完善（Jose et al., 2011；张敏等，2019）。

马尾松（*Pinus massoniana*）是我国南方特有的乡土造林树种，具有较好的发展前景。近年研究发现，马尾松人工林土壤供 N、P 能力逐渐下降，马尾松生长由 P 限制转变为 N、P 限制的风险增强（盘金文等，2020；Hou et al., 2020）。目前，马尾松幼苗施肥研究也取得较大进展，特别是在肥种效应（Ge et al., 2019）、单一肥种施肥量（吴修蓉等，2019）、不同氮形态（王胤等，2021）方面取得丰厚成果。适宜的施肥对马尾松叶绿素含量和生物量积累存在一定影响，应用配比施肥方法揭示不同 N、P、K 水平对马尾松幼苗生长、光合色素含量及叶片养分的影响，从而提出马尾松幼苗施肥管理的最佳配方，此研究较少。为此，

本研究以 1 年生马尾松幼苗为试验材料，采用 L_{16}（4^3）正交设计，设置不同 N、P、K 水平的配比组合，探讨不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响，以期寻找马尾松幼苗的最佳施肥组合，为优质马尾松幼苗的培育与施肥管理提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地于贵阳市花溪区贵州大学林学院实验苗圃（104°39′—104°40′ E，26°26′—26°27′ N）内进行。该区气候属于亚热带湿润温和气候，平均海拔 920 m，年平均温度 15.6 ℃，年降水量 1 229 mm。

1.2 试验材料

2017 年 4 月，于都匀市马尾松国家良种基地 1.5 代种子种园内的同一半同胞家系中，选取长势均一的 112 株幼苗，移栽至贵州大学南校区苗圃进行施肥试验，缓苗 3 个月，7 月上旬开始施肥试验。试验前测得苗木苗高为 20.06 ±2 cm，地径为 3.67 ±0.4 mm。实验选用 20～40 目含硅量大于 98%的石英砂作为盆栽基质，石英砂经 0.3%盐酸浸泡一周后并清洗干净，装于 19cm（径）× 22cm（高）的塑料盆中，每盆约 4.5 kg 待用。营养液选用 Hoagland 和 Arnon 配方进行配置，且试验期间选用 NH_4NO_3、KNO_3、$NH_4H_2PO_4$、KH_2PO_4、K_2CO_3 提供 N、P、K 元素进行施肥试验。

1.3 试验设计

参照周玮和周运超（2011）和简才源（2015）研究结果，采用 3 因素 4 水平 L_{16}（4^3）正交试验设计，其中，N 因素 4 个水平分别为 0.75、3.75、8.25、15.00 mmol·L^{-1}，P 因素 4 个水平分别为 0.05、0.25、0.55、1.00 mmol·L^{-1}，K 因素 4 个水平分别为 0.3、1.5、3.00、6.00 mmol·L^{-1}，各因素水平从低浓度到高浓度用 1、2、3、4 表示。共计 16 个（表 1）处理，每个处理 7 株幼苗。2017 年 7 月初进行施肥试验，每 5 d 浇灌 1 次营养液，每次 100 mL，期间酌情补水，培养 3 个月。

表 1　施肥配方

Table 1　Fertilization formula

处理 Treatment	施肥组合 Fertilizer combination	处理 Treatment	施肥组合 Fertilizer combination
1	N1P1K1	9	N3P1K3
2	N1P2K2	10	N3P2K4
3	N1P3K3	11	N3P3K1
4	N1P4K4	12	N3P4K2
5	N2P1K2	13	N4P1K4
6	N2P2K1	14	N4P2K3
7	N2P3K4	15	N4P3K2
8	N2P4K3	16	N4P4K1

1.4 指标测定

苗高和地径测定：2017 年 7 月初测定苗高和地径初始值，之后每隔 15 d 用卷尺测定苗高（精确到 0.1 cm），用游标卡尺测定地径（精确到 0.01 mm），为期 3 个月。

生物量测定：每个处理组合挖取 5 株幼苗，充分洗净植株上附着物，用吸水纸吸干水分，从土痕处用枝剪剪开，分地上与地下部分装入信封袋，在烘箱内经 105 ℃杀青 30 min 后 70℃烘干至恒重，待冷却后用电子天平测定其干重（精确到 0.001 g）。

苗木质量指数=苗木总生物量/（苗高/地径+地上干质量/地下干质量）。

叶片养分测定：采用浓硫酸−高氯酸消煮法进行消煮后，采用靛酚蓝比色法测定全氮，

采用钼锑抗比色法测定全磷，采用火焰光度法测定全钾（LY-T 1270-1999 和 LY-T 1269-1999），每个指标测定 5 个重复。

叶绿素含量测定：针叶剪短后采用 80%的丙酮浸泡，叶片变褪色变白后利用分光光度计测定吸光值，每个处理 4 个重复。

1.5 数据处理

采用 SPSS19.0 软件和 Microsoft Excel 软件进行数据整理及作图，采用多因素方差分析及 Duncan 进行多重比较，并利用隶属函数模糊分析法对各指标进行综合评价，通过计算出各指标的隶属值，进而评定施肥对马尾松幼苗苗木质量的影响。公式如下：

$U(X_i)=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$　（1）

$U(X_i)=1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$　（2）

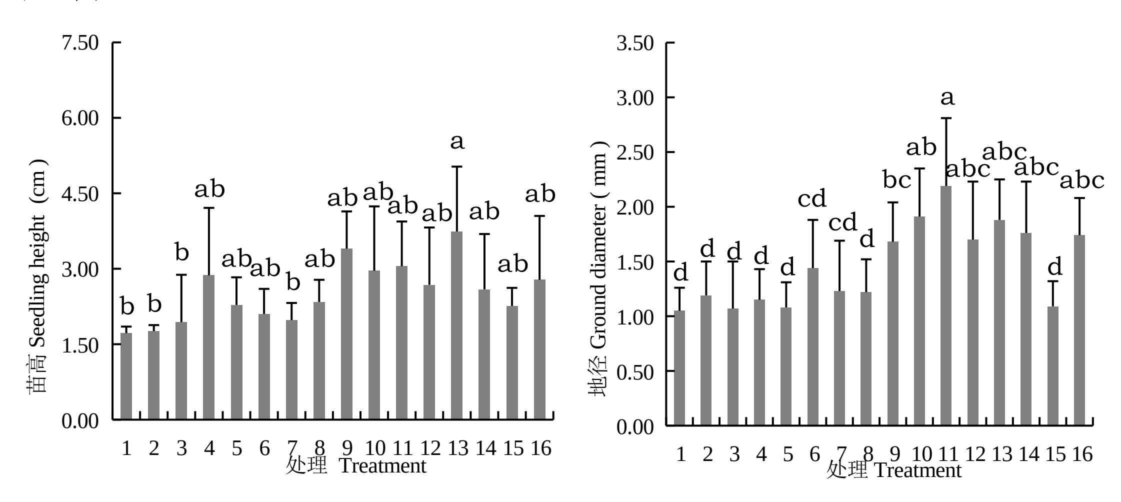
式中：$U(X_i)$为隶属函数值；X_i 为马尾松幼苗的某个测定指标；X_{max}、X_{min} 分别为该一指标内的最大值和最小值。公式（1）使用是表示指标与苗木质量呈正相关，（2）则相反。

2 结果与分析

2.1 配比施肥对幼苗苗高和地径生长量的影响

由图 1 可知，苗高生长量在处理 13 最大，为 3.74 cm，变异系数范围为 6.82%～43.24%；地径生长量在处理 11 生长量最高，值为 2.19 mm，比处理 1 高 108.57%，变异系数范围为 19.54%～40.19%。

N、P、K 对苗高和地径影响的主效应中，施 N 对苗高地径生长有极显著影响（$P<0.01$），施 P 仅对苗高生长有显著影响（$P<0.05$），施 K 对苗高地径生长有显著影响（$P<0.05$），且 N 对苗高和地径的影响最大，K 次之，P 最小，说明苗高地径生长需大量 N、K（表 2）。施肥水平上，配施 N3P1K4 营养液可促进幼苗苗高生长；配施 N3P2K1 营养液可促进地径生长（图 2）。

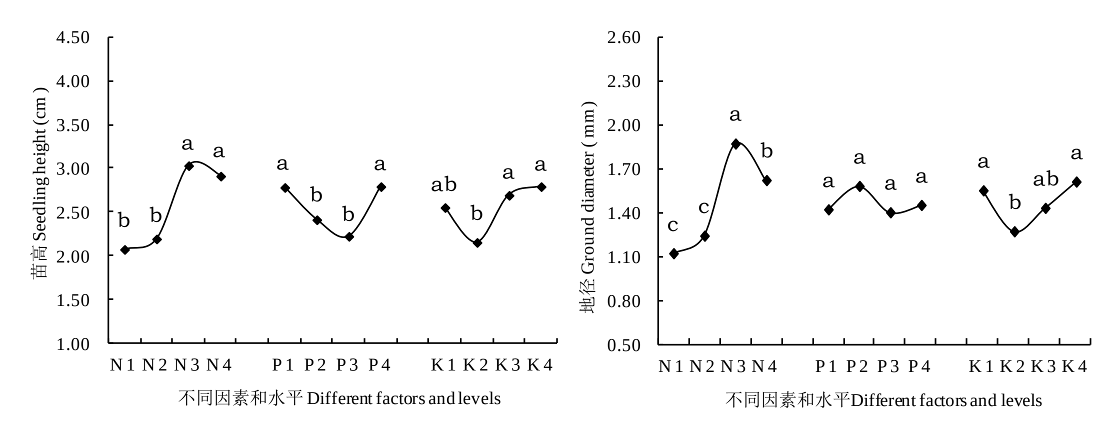


不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$) .The same below.

图 1 施肥处理后幼苗苗高与地径的生长量

Fig 1 Growth of seedling height and ground diameter after fertilization



不同小写字母表示相同因素下施肥水平差异显著（P<0.05）。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences of fertilization levels under the same factor (P<0.05). The same below.

图 2 幼苗苗高与地径在不同施肥水平的生长量

Fig. 2 Growth of seedling height and ground diameter at different fertilization levels

表 2 N、P、K 配比施肥对幼苗生长生理指标的方差分析和直观分析

Table 2 Variance analysis and visual analysis of N, P and K ratio fertilization on seedling growth physiological indexes

指标 Index	因素 Factor	F	极差 Range	指标 Index	因素 Factor	F	极差 Range
苗高生长量 Growth of seedling height	N	9.13^{**}	0.96	叶绿素 b Chlorophyll b	N	7.10^{**}	0.13
	P	3.07^{*}	0.57		P	6.37^{**}	0.11
	K	3.53^{*}	0.74		K	13.05^{**}	0.16
地径生长量 Growth of ground diameter	N	21.01^{**}	0.75	总叶绿素 Total chlorophyll	N	19.11^{**}	0.63
	P	1.11	0.18		P	3.15^{*}	0.27
	K	3.95^{*}	0.34		K	6.27^{**}	0.34
地上生物量 Above-ground biomass	N	37.47^{**}	2.79	N 含量 N content	N	136.47^{**}	12.78
	P	0.75	0.4		P	8.44^{**}	3.37
	K	2.52	0.67		K	12.24^{**}	4.04
地下生物量 Under-ground biomass	N	30.46^{**}	0.89	P 含量 P content	N	134.29^{**}	0.46
	P	3.33^{*}	0.3		P	41.35^{**}	0.26
	K	3.07^{*}	0.29		K	8.00^{**}	0.11
总生物量 Total biomass	N	47.95^{**}	3.53	K 含量 K content	N	21.77^{**}	0.57
	P	1.66	0.6		P	0.56	0.09
	K	3.97^{*}	0.96		K	148.62^{**}	1.53
叶绿素 a Chlorophyll a	N	29.64^{**}	0.59	隶属值 Membership values	N	—	5.42
	P	7.25^{**}	0.33		P	—	1.65
	K	14.05^{**}	0.46		K	—	0.65

注： *和**分别表示施肥因素对相应指标存在显著（P<0.05）和极显著影响（P<0.01）。

Note: Fertilization factors with * and ** have significant（P<0.05） and extremely significant（P<0.01） influences on the corresponding indexes.

2.2 配比施肥对幼苗生物量的影响

由图 3 可知，不同配比施肥处理间生物量存在显著差异。其中，地上生物量、地下生物量、总生物量均在处理 12 最大，其变异系数范围分别为 8.80%～33.95%、9.52%～27.68%、5.01%～16.80%。由表 2 可知，N、P、K 对生物量影响的主效应中，施 N 对幼苗生物量积累有极显著影响（P<0.01），施 P 对地下生物量的积累有显著影响（P<0.05），施 K 对地下生物量及总生物量有显著影响（P<0.05）。各因素对地上生物量和总生物量的影响为 N>K>P，对地下生物量的影响是 N>P>K，说明幼苗生物量以施 N 为主，施 P 促进地下生长，地上生长对 K 的需求高于 P。由图 4 可知，配施 N3P4K3 营养液利于促进幼苗地上下生物量、地下生物量和总生物量的积累。

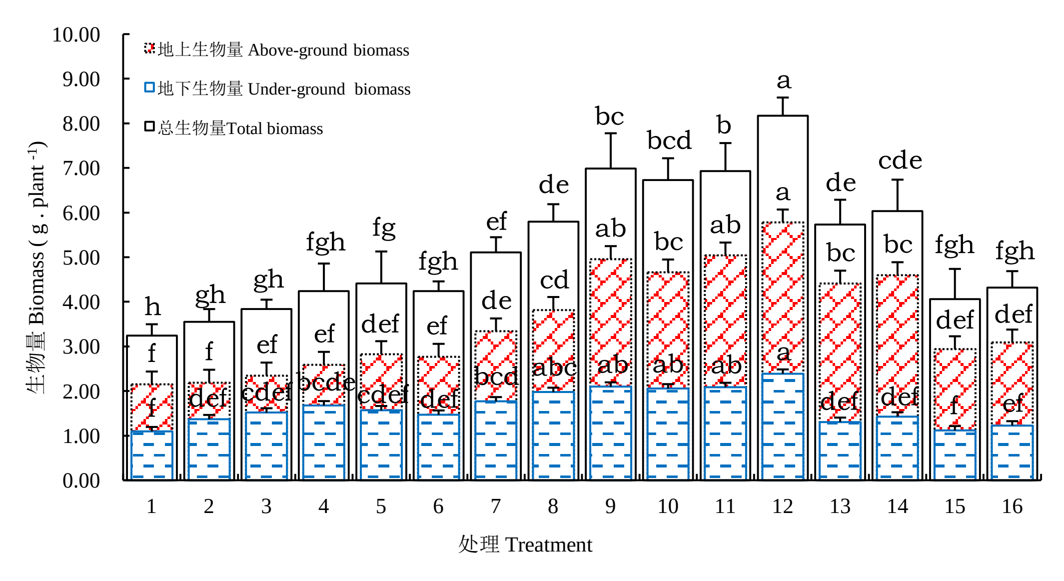


图 3 不同的施肥处理对马尾松幼苗生物量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilizer treatments on biomasses of *Pinus massoniana* seedlings

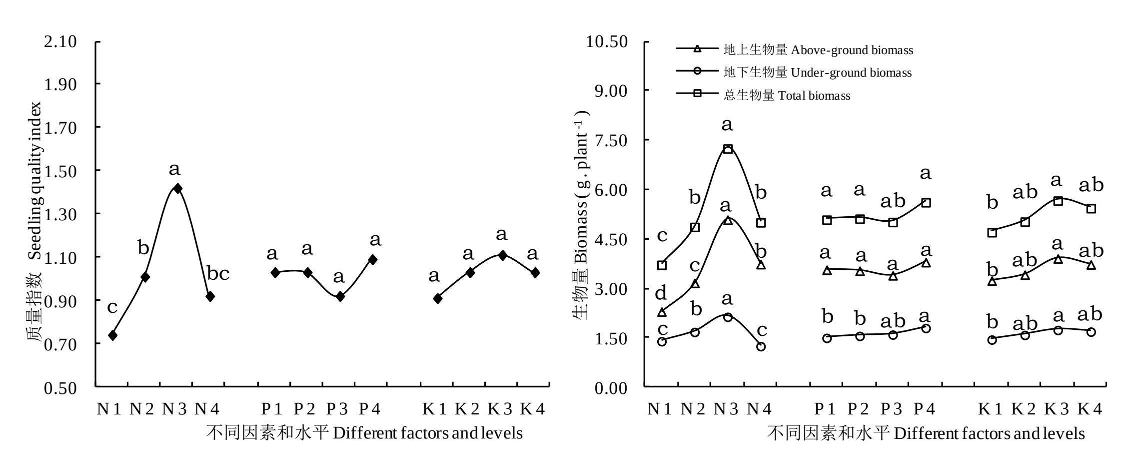


图 4 不同施肥水平下幼苗质量指数和生物量

Fig. 4 Seedling quality indexes and biomasses under different fertilization levels

2.3 配比施肥对幼苗苗木质量指数的影响

由表 3 可知，质量指数最高的是处理 12，较高的还有处理 9、处理 11，组内的变异系数范围为 8.11%～24.05%。N、P、K 对幼苗质量指数影响的主效应中，N 达到极显著水平（P<0.01），P 和 K 未达到显著水平（P>0.05），且对幼苗质量指数的影响大小为 N>K>P，表明幼苗期施 N 利于提高幼苗质量指数。施肥水平上（图 4），发现配施 N3P4K3 营养液利于提高幼苗质量指数。

表 3 施肥处理下幼苗苗木质量指数

Table 3 Seedling quality indexes under fertilization treatments

处理 Treatment	质量指数 Quality index	排序 Rank	处理 Treatment	质量指数 Quality index	排序 Rank
1	0.60±0.07h	16	9	1.36±0.2abc	3
2	0.77±0.17gh	13	10	1.32±0.18abc	4
3	0.74±0.06gh	14	11	1.41±0.21ab	2
4	0.83±0.17fgh	11	12	1.60±0.15a	1
5	1.11±0.22bcdef	7	13	1.06±0.17cdefg	8
6	0.85±0.14efgh	10	14	1.19±0.22bcd	5
7	0.90±0.15defgh	9	15	0.62±0.11h	15
8	1.16±0.24bcde	6	16	0.79±0.19fgh	12

不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments (P<0.05). The same below.

2.4 配比施肥对幼苗叶绿素含量的影响

由图 5 可知，叶绿素 a 含量在处理 12 最高，变异系数范围为 2.02%～12.97%；叶绿素 b 含量在处理最高 5，变异系数范围为 3.03%～15.71%；总叶绿素含量在处理 12 最高，变异系数范围为 2.35%～9.42%。

由表 2 可知，施 N 和 K 对叶绿素含量的影响均达到极显著水平（P<0.01）；施 P 对叶绿素 a 和叶绿素 b 有极显著影响（P<0.01），对总叶绿素有显著影响（P<0.05）。各因素对叶绿素 a 和总叶绿素的影响为 N>K>P；施 K 对叶绿素 b 的影响最高，N 次之，P 最小，可见，不同光合色素对肥种的响应存在差异，N 是影响叶绿素合成的主要因子。施肥水平上（图 6），配施 N2P4K2 可促进叶绿素 b 含量积累，配施 N4P4K2 浓度水平的营养液可促进幼苗叶绿素 a 及总叶绿素含量的积累。

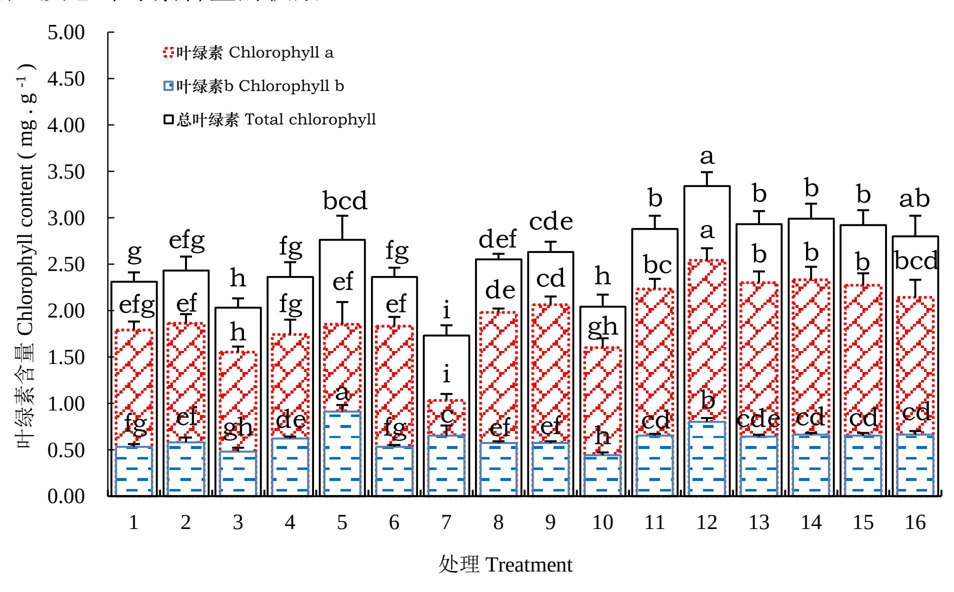


图 5 不同施肥处理下幼苗叶绿素含量

Fig. 5 Chlorophyll contents of seedlings under different fertilization treatments

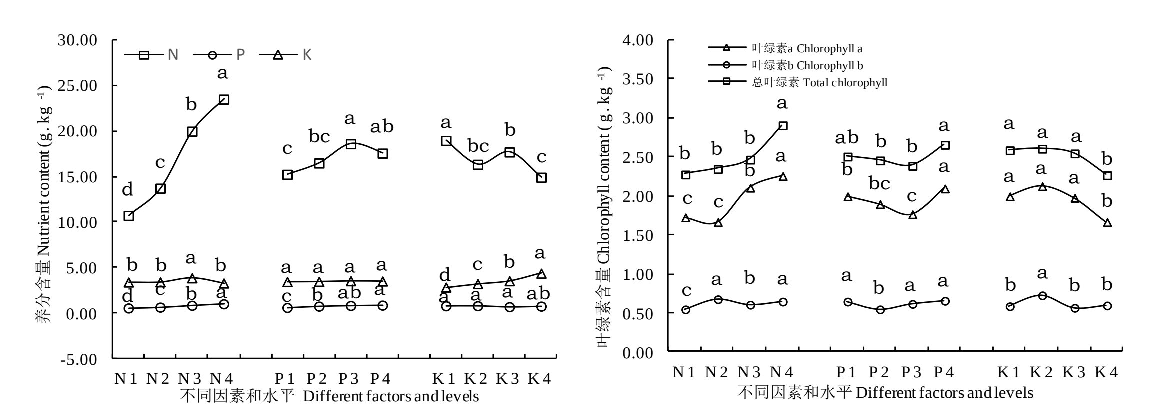


图 6 不同施肥水平下幼苗叶绿素含量和针叶养分含量

Fig. 6 Chlorophyll contents of seedlings and nutrient contents of leaves under different fertilization levels

2.5 配比施肥对幼苗针叶养分含量的影响

由图 7 可知，叶片 N 含量处理 11 最高，变异系数范围为 0.15%～4.31%；P 含量处理 15 最高，变异系数范围为 1.90%～4.76%；K 含量处理 10 最高，变异系数范围为 0.24%～1.60%。表明随施肥量的增加，可促进幼苗叶片养分的积累，且幼苗叶片对 N 的积累高于 K 更高于 P。

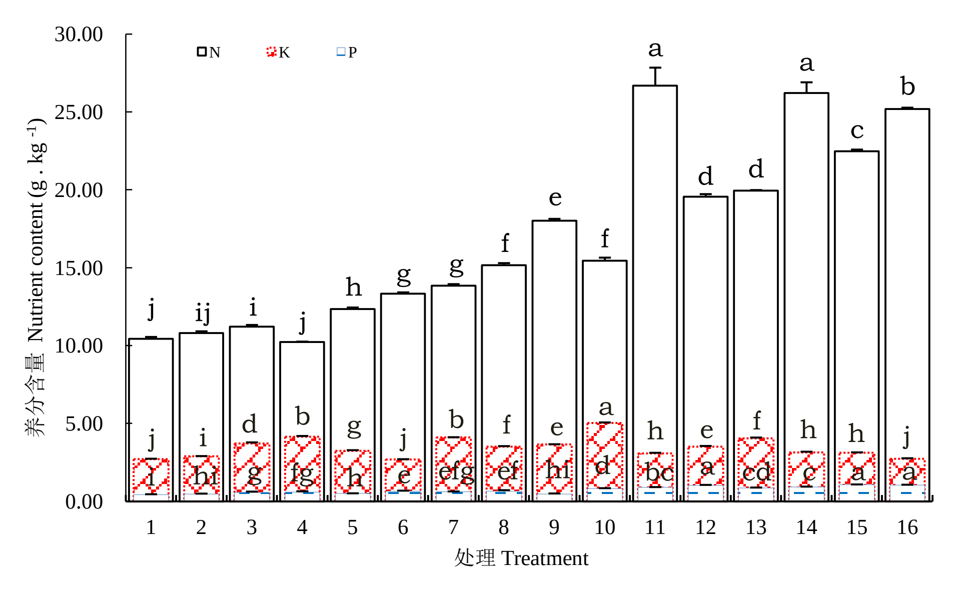


图 7 不同施肥处理后幼苗针叶养分含量

Fig. 7 Nutrient content of seedling after different fertilization treatments

施肥因素对养分含量的影响中，施 N 和 K 对幼苗针叶 N、P、K 含量的影响达到极显著水平（P<0.01）；施 P 对针叶 N 和 P 含量的影响达到极显著水平（P<0.01），但对针叶 K 含量没有显著影响（P>0.05）（表 2）。N、P、K 对针叶 N 含量的影响大小排序为 N>K>P，对针叶 P 含量的影响排序为 N>P>K，对 K 含量的影响排序为 K>N>P，表明幼苗期施 N 有利于促进针叶对 N 和 P 吸收。施肥水平上，施以 N4P3K1 营养液利于促进针叶 N 的积累，配施 N4P4K2 营养液利于针叶 P 含量的积累，配施 N3P3K4 营养液有利于 K 含量的积累（图 6）。

2.6 隶属函数模糊综合评价

为获得马尾松幼苗的最佳施肥配方，选用隶属函数对苗高、地径、生物量、叶绿素含量、

叶片养分含量相关指标进行分析，综合评判不同配比施肥条件下幼苗苗木质量。由表 4 可知，处理 12 苗木综合质量最高。为获得正交试验的最佳施肥组合，对生长生理指标的隶属值进行极差分析（表 2），施 N 促进对幼苗苗高地径生长、生物量积累、叶绿素和针叶养分含量积累的影响最大，P 次之，K 最小，且最佳理论施肥组合是 N3P4K2，即对应正交方案中处理 12，综合表明马尾松幼苗配施 N、P、K 浓度分别为 8.25、1.00、1.5 mmol·L^{-1} 的营养液有利于提高马尾松幼苗综合质量。

表 4 配比施肥处理下幼苗综合苗木质量评价

Table 4 Comprehensive seedling quality evaluation of seedlings under different fertilization treatments

处理 Treatment	隶属值 Membership values	排序 Rank	处理 Treatment	隶属值 Membership values	排序 Rank
1	0.70	16	9	5.86	7
2	1.65	15	10	4.88	6
3	1.39	14	11	8.18	2
4	3.06	12	12	9.54	1
5	3.73	13	13	6.82	5
6	3.11	11	14	7.19	3
7	3.00	10	15	5.45	8
8	4.33	9	16	6.50	4

3 讨论与结论

3.1 施肥对马尾松幼苗生长的影响

施肥是育苗生产实践中保障苗木质量的重要措施，合理的施肥可提升苗木质量（王祥等，2021）。本研究表明，N、P、K 配比施肥对马尾松幼苗生长有促进作用，显著影响苗高、地径和生物量，对苗高、地径、地上生物量及总生物量的影响效应为 N>K>P，这与周樊等（2020）研究薄壳山核桃 N、P、K 配比施肥结果一致。张敏等（2019）认为，植物地上部分生长受 N 素调控，合适的范围内增加 N 素含量可促进地上部分生长，本研究结果与之类似。周玮和周运超（2012）研究 N、P、K 肥种对马尾松幼苗生长结果显示，P 对幼苗苗高地径的影响最大，与本研究结果存在差异。可能是周玮以马尾松林下土壤为基质，所含养分能满足幼苗对 N 的需求，但基质中 P 欠缺，增添 P 会导致响应较大。而本研究盆栽基质为石英砂，基础养分低于土壤，N 浓度较低，导致在 N 浓度较低的环境中，马尾松幼苗根系周围固氮菌丰度和群落多样性降低，添加 N 后苗木为提高菌落丰度加速吸收养分，导致 N 的影响效应最大（赵辉等，2020）。因此，在 N、P 限制风险逐渐增强的生长环境中，马尾松应以施 N 为主，辅以 P、K 进行混合施肥。随着施肥量的增高，地上生物量及地下生物量呈先升后降趋势，当施肥量超过养分吸收临界点时，继续添加养分会对幼苗地下部分的生长造成毒害作用，抑制幼苗的生长（周樊等，2020）。本研究发现，处理 15 生物量显著低于其他处理，处理 12 生物量最高，可能是在 P、K 充足的环境下，过量的施 N 对幼苗造成养分毒害，可见施肥量上也遵循适需原则。

3.2 施肥对马尾松幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素，利用叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素对红光、蓝光和蓝紫光进行吸收，并将能量传递到反应中心产生化学能，增强植物光合作用，提高植株生物量的积累（Li et al., 2019; Vytautas et al., 2020）。在对薄壳山核桃和闽楠的研究中发现，NPK 配方施肥可显著提高幼苗光合色素含量，增强光合速率（郑小琴等，2019；Wang et al., 2020）。本研究中，叶绿素 a 和总叶绿素在处理 12（N3P4K2）含量最高，叶绿素 b 在处理

5 含量最高，说明合理施肥能显著提高马尾松幼苗光合色素含量，促进光合色素分子传递的效率更高，将化学能转化为碳水化合物的能力更强。但促进叶绿素含量积累的最佳施肥组合 N4P4K2 并未出现在处理中，主要因正交施肥试验设计是不完全设计，可通过现有施肥处理推测最佳施肥处理，其结果与王祥等（2021）和张敏等（2019）的结果类似。有研究表明，NPK 配方施肥中 N 是影响叶绿素含量的主要因子，但过高 N 摄入会抑制光合色素合成，降低 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶（Rubisco）活性，造成捕光能力下降，光合速率受损（郑小琴等，2019；Wang et al., 2020）。与前人研究不同的是，本研究叶绿素含量随施 N 水平的增加而呈上升趋势。可能是本研究所配施水平低于抑制光合酶活性的临界值，并未对光合系统造成损害，后期可进一步开展高 N 含量的试验进行验证。

3.3 施肥对马尾松幼苗针叶养分含量的影响

合理施肥能促使植物体内的 N、P、K 保持在适当水平，从而达到维持植物正常生长发育的目的（郑小琴等，2019）。叶片作为养分的主要储存库，其 N、P、K 的含量关系植物光合作用强弱及干物质积累能力（杨阳等，2021），但不同树种叶片对养分的积累存在差异。试验发现，马尾松幼苗针叶养分的积累呈现 N>K>P 的现象，与辣木类似（张敏等，2019），说明马尾松幼苗针叶对 N、K 的需求量更大。但与辣木和薄壳山核桃不同（张敏等，2019；郑小琴等，2019），一方面可能是不同树种需肥特性存在差异，马尾松是喜光树种，需要大量的 N 素提供能量增加叶绿素，同时促进苗木加速对 K 的吸收以增强 Rubisco 酶活性，达到提升光合作用的效果（Xu et al., 2019）。另一方面可能是基质中含有大量络合有效 P 的金属离子，导致幼苗通过消耗体内 P 含量达到维持内稳态平衡目的，最终造成幼苗叶片 P 含量最低的现象（Duncan et al., 2012）。有研究发现，苗木体内 N 含量较高时，参与植物呼吸作用、光合作用及生理代谢的 P、K 含量也较高，说明配比施肥对矿质营养的吸收是相互作用的（周维等，2016；杨阳等，2021）。本研究结果与之类似，即在 N3 和 N4 水平有利于针叶 N、P、K 的积累。

综上所述，在本试验环境下，处理 12 可显著提高马尾松幼苗生物量、质量指数、叶绿素 a 和总叶绿素含量；针叶对养分的积累呈现 N>K>P 的现象，且马尾松幼苗生长受 N 的影响最大，在施肥时应以施 N 为主，施以 P、K 相辅。运用隶属函数及极差法综合分析发现，马尾松幼苗最佳施肥组合是 N3P4K2，对应施肥处理 12，即 N、P、K 最佳施肥浓度分别为 8.25、1.00、1.5 mmol·L^{-1}。

参考文献：

CHEN L, LU LH, MENG CL, 2017. Combined effects of nitrogen, phosphorus and potassiumm on the growth and photosynthesis of *Manglietia glauca* seedlings[J]. J NW For Univ, 32 (2): 16-21. [陈琳，卢立华，蒙彩兰，2017. 氮、磷、钾对灰木莲幼苗生长和光合作用的影响[J]. 西北林学院学报，32 (2)：16-21.]

GE XG, YANG ZY, ZHOU BZ, et al., 2019. Biochar fertilization significantly increases nutrient levels in plants and soil but has no effect on biomass of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* hook saplings during the first growing season[J]. Forests, 10(8): 612.

HOU EQ, LUO YQ, KUANG YW, et al., 2020. Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems[J]. Nat Commun, 11(1): 1135-1142.

JIAN CY, 2015. Study on demand law of water and nutrient and quantitative regulation project of *Pinus massoniana* seedlings[D]. Guiyang：Guizhou University. [简才源，2015. 马尾松幼苗水肥需求规律与定量调控方案研究[D]. 贵阳：贵州大学.]

JOSE PCN, ENILSON BS, REYNALDO CS, et al., 2011. Effect of NPK fertilization on production and leaf nutrient content of eucalyptus minicuttings in nutrient solution[J]. Rev Bras

Cienc Solo, 35(1): 249-254.
PAN JW, GUO QQ, SUN XG, et al., 2020. Contents and stoichometric characteristics of C, N, P an K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations[J]. Plant Nutr & Fert Sci, 26(4): 746-756. [盘金文，郭其强，孙学广，等，2020. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J]．植物营养与肥料学报，26 (4)：746-756.]
PENG ZT, CHEN MX, HUANG ZJ, et al., 2020. Non-structural carbohydrates regulated by nitrogen and phosphorus fertilization varied with organs and fertilizer levels in *Moringa oleifera* seedlings[J]. J Plant Growth Regul, 40(4): 1777-1786.
SCHOENBECK L, GESSLER A, SCHAUB M, et al., 2020. Soil nutrients and lowered source: sink ratio mitigate effects of mild but not of extreme drought in trees[J]. Environ Exp Bot, 169, 103905.
VYTAUTAS B, DUFFTY C, 2020. Excitation quenching in chlorophyll-cartotenoid antenna systenm: ‘coherent’ or ‘incoherent’ [J]. Photosynth Res, 144(3): 301-315.
WANG X, BAI JJ, HE Q, et al., 2021. Effects of different formulated fertilization on the growth and physiological characterstics of *Catalpa bungei* seedling [J]. For Environ Sci, 37(3): 40-46.[王祥，白晶晶，何茜，等，2021. 氮磷钾配方施肥对楸树苗期生长及养分利用的影响[J]．林业与环境科学，37(3)：40-46.]
WANG X, WEI XL, WU GY, et al., 2020. High nitrate or ammonium applications alleviated photosynthetic decline of *Phoebe bournei* seedlings under elevated carbon dioxide[J]. Forests, 11(3): 293.
WANG Y, YAO RL, 2021. Effects of different nitrogen forms and ratios on growth of tissue cultured seedlings in *Pinus massoniana*[J]. J Cen South Univ For & Technol, 41(3): 18-24. [王胤，姚瑞玲，2021. 不同形态氮素配比对马尾松组培苗生长的影响[J]．中南林业科技大学学报，41(3)：18-24.]
WU XR, ZHOU YC, YU X, 2019. Effect of magnesium fertilizer on growth and accumulation of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Subtrop Plant Sci, 48(1): 11-16. [吴修蓉，周运超，余星，2019. 镁肥对马尾松幼苗生长与叶片元素积累的影响[J]．亚热带植物科学，48(1)：11-16.]
XU XX, HOU X, JIA ZH, et al., 2019. Effects of potassium supply on the growth, photosynthesis and 15N and 13C absorption and utilization of M9T337 seedling[J]. J Appl Ecol, 30(6): 1186-1868.
YANG Y, ZHANG DP, JI L, et al., 2021. Effects of formula fertilization on growth, nutrient accumulation and morphology of *Tilia amurensis* seedlings[J/OL]. J Cen South Univ For & Technol, 2021(9):63-70 [2021-08-16]. https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.09.007. [杨阳，张德鹏，及利，等，2021. 配比施肥对紫椴播种苗生长、养分积累及根系形态的影响[J/OL]．中南林业科技大学学报，2021(9):63-70[2021-08-16]. https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.09.007.]
ZHANG M, YANG HY, BAO L, et al., 2019. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio fertilization on growth and leaf nutrient absorption of *Moringa oleifera*[J]. For Res, 32(5): 114-120. [张敏，杨浩瑜，包立，等，2019. 氮、磷、钾配比施肥对辣木生长及叶片养分吸收的影响[J]．林业科学研究，32(5)：114-120.]
ZHAO H, ZHOU YC, 2020. Characteristics of structure and abundance of nitrogen-fixing bacterial community in *Pinus massoinana* soil developed from different parent rocks[J]. Acta Ecol Sin, 40(17): 689-6201. [赵辉，周运超，2020. 不同母岩发育马尾松土壤固氮菌群落结构和丰度特征[J]．生态学报，40(17)：6189-6201.]

ZHENG XQ, CHEN WJ, CAO F, et al., 2019. Effects of the proportional feitilization on the nutrient content and photosynthesis of young grafted pecan seedlings[J]. J Nanjing For Univ, 43(5): 169-174. [郑小琴，陈文静，曹凡，等，2019. 配方施肥对薄壳山核桃苗期养分含量及光合作用的影响[J]．南京林业大学学报，43(5)：169-174.]

ZHOU F, CHEN WJ, CAO F, et al., 2020. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of pecan seedlings[J]. J Cen South Univ For & Technol, 40(9): 96-103. [周樊，陈文静，曹凡，等，2019. 配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响[J]．中南林业科技大学学报，40(9)：96-103.]

ZHOU W, ZHOU YC, 2012. Effects of different fertilizer treatment on *Pinus massoniana* seedlings and root environment[J]. J Cen South Univ For & Technol, 32(7): 9-23. [周玮，周运超，2012. 不同施肥处理对马尾松幼苗及根际环境的影响[J]. 中南林业科技大学学报，32(7)：19-23.]

ZHOU W, ZHOU YC, 2011. Effects on the growth of *Pinus massoniana* seedlings and root under different fertilizer treatments[J]. J Nanjing For Univ, 35(3): 70-74. [周玮，周运超，2011. 施肥对马尾松幼苗及根系生长的影响[J]．南京林业大学学报，35(3)：70-74.]